# 基于星载辐射源的被动 SAR 频率同步: 误差分析与同步方法

## 张启雷 常文革 李建阳

(国防科学技术大学电子科学与工程学院,湖南长沙410073)

摘 要:基于星载辐射源的被动 SAR 的收、发系统采用各自独立的频率源,因此,其收、发系统本振信号存在着频率同 步误差。在接收端解调过程中,该频率同步误差会引入一定的相位误差,进而影响下一步的成像处理。本文针对基于星载辐 射源、采用地面固定接收机的被动 SAR 系统,分析了不同类型的频率同步误差对其方位向相位的影响,提出了一种利用直 达波信号提取相位误差的频率同步方法。在利用直达波信号提取相位误差时,零多普勒时间的精确估计是关键问题。文章 改进了零多普勒时间的估计方法,提高了其估计精度,从而较好地实现了频率同步。最后仿真分析了研究结论的有效性。

关键词: 被动 SAR; 频率同步; 直达波; 零多普勒时间估计 中图分类号: TN957 文献标识码: A 文章编号: 1003-0530(2010)05-0725-05

## Frequency Synchronization of The Passive SAR Based on Spaceborne Transmitters: Errors Analysis and Synchronization Approach

#### ZHANG Qi-lei CHANG Wen-ge LI Jian-yang

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, 410073, China)

Abstract: The frequency synchronization errors exist in the Local Oscillating Signals of the transmitters and receivers of the passive SAR based on spaceborne transmitters because the transmitters and receivers are mounted on separated platforms. Phase errors is introduced in echo demodulation process because of the frequency synchronization error, and then, the final focus result will be deteriorated. This paper focus on the passive fixed-receiver SAR based on spaceborne transmitters. First, this paper discusses the influence of various frequency synchronization errors on azimuth phase. And then, a frequency synchronization approach of using direct-path echo is presented, in which we obtain the phase error from direct-path. In the process of obtaining the phase error, the Zero Doppler Time is the key. A more precise estimation method of the Zero Doppler Time has been improved, and the frequency synchronization is achieved. Finally, simulations are carried out to prove the validity of the research result.

Key words: Passive SAR; Frequency Synchronization; Direct-path echo; Estimation of Zero Doppler Time

#### 1 引言

基于星载辐射源的被动 SAR 是目前国内外的研究 热点之一。该系统具有很多优点,尤其是较低的实现成 本和多样化的功能,使其具有巨大的应用潜能。但是,由 于收、发平台分置,其系统实现存在一系列新的技术问 题。频率同步问题是首先需要解决的关键技术之一。

与常规 SAR 不同,基于星载辐射源的被动 SAR 的 收、发系统采用各自独立的频率源,因此,收、发系统本 振信号必然存在不一致,即存在频率同步误差。该频 率同步误差在接收端解调过程中会引入一定的相位误

收稿日期: 2009年6月23日; 修回日期: 2009年10月21日

差,进而影响下一步的成像处理。文献[1]和文献[2] 从不同角度研究了振荡器相位噪声对双站 SAR 成像的 影响,文献[3]研究了振荡器相位噪声的仿真生成并提 出了一种频率同步的实现方法,但没有给出同步结果。 文献[4-6]较深入地研究了利用直达波信号进行时间 与频率同步的实现方法,但精度并不高。

本文针对基于星载辐射源、采用地面固定接收机的被动 SAR 系统,首先引入了频率同步误差模型,然后分析了不同类型的频率同步误差对方位向相位的影响,并由此得到被动 SAR 频率同步精度要求,进而提出了一种利用直达波信号提取相位误差的频率同步方

法。在利用直达波信号提取相位误差时,零多普勒时 间的精确估计是关键问题。文章改进了零多普勒时间 的估计方法,提高了估计精度,从而较好地实现了频率 同步。本文提出的方法易于实现,且精度较高,为解决 被动 SAR 频率同步问题提供了一种参考。

#### 2 频率同步误差模型

基于星载辐射源,采用固定接收机的被动 SAR 系 统,其几何配置如图1所示:星载辐射源沿预定轨道飞行 并发射脉冲信号,信号经目标反射后被固定接收机接收 并成像。由于收、发系统采用各自独立的频率源,因此, 假设发射机与接收机中心频率分别为 $f_r(t)$ 与 $f_r(t)$ 。



图 1 基于星载辐射源被动 SAR 几何配置

频率源输出信号的瞬时相位可以表示为<sup>[7]</sup>:

 $\phi(t) = 2\pi f_0 t + 2\pi \Delta f_0 t + \pi p t^2 + \varphi_n(t) + \varphi_0 \qquad (1)$ 其中初始相位  $\varphi_0$  是固定值,对成像没有影响,可以忽 略;  $\Delta f_0$  为固定频率偏差,取决于频率源的准确度; p 为 频率漂移速率,一般是由频率源老化引起的; $\phi_{s}(t)$ 为 相位噪声,是频率源短期稳定性的外在表现。

因此,设发射机,接收机中心频率分别为:

$$f_{T}(t) = f_{0} + \Delta f_{T} + p_{T} \cdot t + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_{nT}(t)}{dt}$$
(2)

$$f_{R}(t) = f_{0} + \Delta f_{R} + p_{R} \cdot t + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_{nR}(t)}{dt}$$
(3)

假设发射机在 $t_n = n \cdot PRI(PRI 为脉冲重复周$ 期)时刻发射第 n 个线性调频信号脉冲,则经过时间延 迟 $t_d = \frac{R(t_n)}{c}$ 之后,接收机接收到的地面目标反射回 波可以表示为[8]:

$$s(t,t_n) = p_0(t - t_n - t_d) \exp(j2\pi \int_0^{t - t_d} f_T(t') dt') \quad (4)$$
  
İE + .

$$p_0(t) = rect(\frac{t}{T_p})\exp(j\pi kt^2)$$
(5)

 $R(t_n)$  为收、发距离和,  $T_n$  为脉冲宽度,  $t \in [0,T]$ , T 为整个系统的工作时间。

接收机本振信号为:

$$s_{L}(t) = \exp(-j2\pi \int_{0}^{t} f_{R}(t') dt')$$
 (6)

回波信号经解调后的基带信号可以表示为:

$$s_{D}(t,t_{n}) = s(t,t_{n}) \cdot s_{L}(t_{n})$$

$$\approx p_{0}(t-t_{n}-t_{d})\exp(-j2\pi f_{0}t_{d})\exp(j\Delta\phi_{R})\exp(j\Delta\phi_{A})$$
(7)

其中 $\Delta \phi_{R}$ 和 $\Delta \phi_{A}$ 分别为引入的距离向和方位向相位误 差:

$$\Delta \phi_R = -j2\pi (\Delta f_T t_d + P_T t_n t_d)$$

$$\Delta \phi_A = j2\pi (\Delta f_T - \Delta f_R) t_n +$$
(8)

$$j\pi(P_{T} - P_{R})t_{n}^{2} + (\varphi_{nT}(t_{n}) - \varphi_{nR}(t_{n}))$$
(9)

由式(7)可知,频率同步误差在解调后的基带信号中引 入了一定的相位误差,进而将影响被动 SAR 成像结果。

#### 频率同步误差对方位向相位的影响 3

频率同步误差对距离向聚焦的影响并不明显,但 会引起方位向聚焦性能的显著恶化:主瓣变宽、峰值移 动、旁瓣电平抬高,甚至严重散焦,不能成像[2-4]。因 此,本文主要分析频率同步误差引起的方位向相位误差。

#### **3.1** 固定频率偏差

假设收、发频率源只存在固定频率偏差,则其引起 的方位向相位误差为:

$$\Delta \varphi(t_n) = \int_0^{t_n} 2\pi \Delta f \, dt = 2\pi \Delta f t_n \tag{10}$$

其中:  $\Delta f = \Delta f_T - \Delta f_R$ 。由式(10)可知,固定频率偏差 将引起方位向线性相位误差,进而造成目标像点的方 位向偏移。一般认为当  $|\Delta \varphi(t_{a})| \leq \pi/4$  时,该相位误 差的影响可以忽略。假设系统工作时间为T,则要求:

$$\alpha = \frac{|\Delta f|}{f_0} \le \frac{1}{8f_0 T} \tag{11}$$

由此可见,随系统中心频率和工作时间的增加,对频率 源准确度  $\alpha$  的要求更加苛刻。假设  $f_0 = 5.3 GHz$ , T =10s,则  $\alpha$  ≤ 2.4 × 10<sup>-12</sup>。这样高准确度的频率源在工 程中是很难实现的。

#### 3.2 线性频率漂移

假设收、发频率源只存在线性频率漂移,则其引起 的方位向相位误差为:

$$\Delta\varphi(t_n) = \int_0^{t_n} 2\pi pt \ dt = \pi p t_n^2 \qquad (12)$$

其中: $p = p_T - p_R$ 。由式(12)可知,频率源的线性频率 漂移将造成方位向二次相位误差,该相位误差将造成 方位向成像散焦,是影响被动 SAR 成像的主要因素。 同样以  $\pi/4$  为相位误差容限,则 p 必须达到:

$$p \le \frac{1}{4T^2} \tag{13}$$

由式(13)可知:随系统工作时间的增加,对频率源的线 性频率漂移速度要求将更高。仍然假设T = 10s,  $p \le 2.5 \times 10^{-3} Hz/s$ 。而实际的频率源线性频率漂移速度 如表1所示:

振荡器类型	TCXO	OCXO	超高稳晶振
插索湮我家	10 - 100 Hz/s	1 - 10 Hz/s	0.1 - 1 Hz/s

表1 振荡器线性频率漂移速度<sup>[9]</sup>

由表1可知,如此高精度的晶振频率源几乎是不存在的。

#### 3.3 相位噪声

由于相位噪声对距离向的影响忽略不计<sup>[1-2]</sup>,因此,可以认为相位噪声是沿方位向缓变的随机过程。

$$\Delta \varphi(t_n) = \varphi_{nT}(t_n) - \varphi_{nR}(t_n)$$
(14)

被动 SAR 系统在解调过程中,两个独立频率源的 相位噪声会叠加在一起,使得量值较大的低频分量进 一步增加,严重影响成像结果<sup>[2]</sup>。

通过以上分析,我们知道被动 SAR 的频率同步对 系统器件精度提出了非常苛刻的要求,几乎不可能工 程实现。因此,只能设法通过回波数据信号处理来实 现被动 SAR 的频率同步。

#### 4 相位误差提取

从上节分析可以看出:频率同步误差主要在方位 向引入了显著的相位误差。因此,忽略频率同步误差 对距离向聚焦的影响,被动 SAR 距离脉压后的信号可 以表示为:

$$s_{RC}(\tau, t_n) \approx \operatorname{sinc}[B_R(\tau - t_d)] \exp(-j2\pi f_0 \frac{R(t_n)}{c})$$
$$\exp(j\Delta\varphi(t_n)) \tag{15}$$

其中  $\Delta \varphi(t_n)$  为频率同步误差引起的方位向相位误差。 由式(15)可知,如果我们能够获得相位历程 exp  $(-j2\pi f_0 \frac{R(t_n)}{c})$ ,并加以消除,则可以从距离脉压信 号中提取相位误差  $\Delta \varphi(t_n)$ 。而相位历程取决于距离 历程  $R(t_n)$ ,因此,相位误差提取的关键在于距离历程  $R(t_n)$ 的精确重建。

直达波信号信噪比高,且其距离历程只取决于收、 发系统的距离变化,便于重建,有利于精确提取相位信 息。因此,我们在系统中增设直达波通道,从直达波信 号中提取相位误差,然后在反射波通道中加以消除,进 而实现系统频率同步。

受波束同步的限制,基于星载辐射源,采用固定接 收机的被动 SAR 系统成像区域一般较小(约 2Km × 2Km),因此可以假设在系统工作时间内,卫星沿直线 匀速飞行,则收发系统的直线距离可以表示为:

 $R(t_n) = \sqrt{R_0^2 + \nu^2 (t_n - t_0)^2}$  (16) 其中:  $R_0$  为收、发站最短距离,  $\nu$  为卫星运行速度,  $t_n$ 为方位向慢时间,  $t_0$  为零多普勒时间。一般情况下, 尽 管可以比较精确地得到卫星轨道参数  $R_0$ ,  $\nu$ , 但由于 卫星星历误差等因素, 零多普勒时间  $t_0$  的预测精度只 能达到 0.5s 左右<sup>[6]</sup>。因此, 零多普勒时间  $t_0$  的准确估 计是保证相位误差提取精度的关键。

#### 5 零多普勒时间估计

在单站 SAR 中,我们可以利用频谱信息,例如通过 多普勒中心估计来计算得到零多普勒时间 t<sub>0</sub>。但在被 动 SAR 中,由于频率同步误差的存在,我们不可能在频 域准确获取零多普勒时间 t<sub>0</sub>。

文献[6]提出通过提取直达波脉压峰值位置,获取 距离单元徙动(RCM),然后采用高阶多项式拟合 RCM 的方法提取 t<sub>0</sub>。但是,由于距离向脉冲压缩是在数字 域实现的,因此,提取到的 RCM 为一组离散序列值(见 图 4),对该离散序列采用直接拟合的方法得到的 t<sub>0</sub> 估 计值精度很差,不满足相位误差提取的精度要求。

假设接收机采样率为*f*<sub>s</sub>,则直达波距离向分辨单 元为:

$$\Delta R = c/f_s \tag{17}$$

提取到的 RCM 可以表示为:

 $R_{cm} = R(t_n) + e(t_n) + e_F$  (18)

其中 –  $\Delta R/2 < e(t_n) \leq \Delta R/2$  相当于量化噪声,  $m e_r$  为量值较大的频率源固定频率偏移在距离向引起的峰值位置移动。在一次系统工作时间内,  $e_r$  是一个定值。

如果零多普勒时间  $t_0 = 0$ ,则直达波距离历程可 以表示为:

$$R'(t_n) = \sqrt{R_0^2 + \nu^2 t_n^2}$$
(19)  
式(19)与式(18)相减可得距离走动曲线:

$$R_{L}(t_{n}) \approx \frac{\nu^{2} t_{0}}{R_{0}} t_{n} - \frac{1}{2} \frac{\nu^{2}}{R_{0}} t_{0}^{2} - e(t_{n}) - e_{F} \qquad (20)$$

一般情况下,假设量化噪声服从均值为零的等概 率密度分布。但为了推导方便,可以假设其服从(0,  $\frac{\Delta R^2}{12}$ )的高斯分布,则式(20)的形式显然满足下面的线 性模型:

 $R_L(t_n) = A + B \cdot t_n + e(t_n)$  (21)

 其中:截距 A 为常数项,斜率 B 包含待估计  $t_0$ 。由参数

 估计理论可知,  $[A,B]^T$ 存在最小方差无偏(MVU)估

 计:

$$\begin{bmatrix} \hat{A} \\ B \end{bmatrix} = (H^T H)^{-1} H^T R_L$$
 (22)



$$C_{[A,B]^{T}} = \frac{\Delta R^{2}}{4} (H^{T}H)^{-1}$$
 (23)

其中:

$$H^{T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ t_{1} & t_{2} & \cdots & t_{N} \end{bmatrix}$$
(24)

式(23)中主对角线元素分别表示待估计参数的方差。 那么,零多普勒时间 t<sub>0</sub> 的 MVU 估计值为:

$$t_0 = B \cdot \frac{R_0}{\nu^2} \tag{25}$$

且其估计精度用根方差可以表示为:

$$\sigma_{t_0} = \frac{R_0}{\nu^2} \sqrt{C_{[A,B]^T}(2,2)}$$
(26)

其中  $C_{[A,B]^{r}}(2,2)$  表示协方差阵的第2个主对角线元 素。值得一提的是, $t_0$ 的 MVU 估计值等价于通过线性 拟合得到的结果。

实际上,假设量化噪声服从正态分布并不是十分 精确。因此,通过本文方法得到的 t<sub>0</sub> 只是其近似 MVU 估计值。

#### 6 仿真与分析

综上,基于星载辐 射源,采用固定接收机 的被动 SAR 系统频率 同步的实现步骤为:首 先对直达波信号进行 距离向脉冲压缩,进而 提取相位误差,然后在 反射波通道加以校正, 最终实现频率同步。 而相位误差提取的步 骤如图2 所示:



图 2 相位误差提取

为了验证上述方法的有效性,采用仿真数据来分析。假设系统采用欧空局 Envisat 卫星 ASAR 作为发射机,仿真参数如:

表2	仿真参数

中心频率	5.3GHz	
PRF	1640Hz	
信号带宽	16MHz	
采样频率	33MHz	
脉冲宽度	33us	
中心斜距	841 Km	
卫星速度	7100m/s	
零多普勒时间	-0.38s	
频率准确度	4ppm	
频率漂移速度	100Hz/s	
相位噪声	10 -9	

由上述参数可知:固定频率偏差  $\Delta f = 4 \times 10^{-6} \times 5.3 \times 10^{9} = 21.2 KHz$ ,线性频率漂移 p = 100 Hz/s,不 满足式(11)和式(13)的指标要求,而相位噪声也不能 达到双站 SAR 对频率源相位噪声的要求: $10^{-11}$ (阿伦 方差)<sup>[2]</sup>。图 3 为被动 SAR 方位向回波信号压缩处理 的结果。虚线表示无频率同步误差时的理想结果,实 线表示存在频率同步误差的结果。由图 3 可知,频率 同步误差造成被动 SAR 方位向压缩严重散焦。因此, 必须采取有效手段实现频率同步。





直达波信号距离向脉冲压缩后,提取到距离单元 徒动(RCM)如图4左图中实线所示,而其中的虚线表 示零多普勒时间为0时的理想RCM曲线。从中可见, 由于距离采样率的缘故,提取到的RCM呈现锯齿状。 如果直接采用多项式拟合方法,则的t<sub>0</sub>估计值为 0.4788s,精度不能达到同步要求。

将图 4 左图中的两条曲线相减,可以得到距离走动曲线如图 4 右图,然后对之进行线性拟合,则可以得到  $t_0$  为 – 0.3790 s。该估计方法的精度由式(26)计算得到:



图4 距离单元徙动

由于 t<sub>0</sub>不能完全精确估计,按照本文介绍的方法 消除相位误差后,被动 SAR 方位向相位仍然存在一定 的残余误差,如图 5 所示。从左图可以看到:残余相位

729

误差中有明显的线性分量,这相当于存在残余的固定 频率偏差。在一次系统工作时间内,这是一个常数,只 会引起像点在方位向的整体移动,不会影响聚焦效果。 忽略线性误差后的残余误差如右图,可见相位误差提 取精度相当高。



假设直达波通道与反射波通道严格一致,则在反 射波通道中消去上边提取的相位误差,方位向信号压 缩结果如图 6 所示。虚线表示理想结果,实线表示消 去相位误差后的结果。由图 6 可见,除了之前提到的 像点偏移外,消除频率同步误差后的成像结果与理想 情况非常接近,说明本文介绍的方法对于实现频率同 步非常有效。



图 6 消除相位误差后的被动 SAR 方位向压缩结果

## 7 结束语

频率同步是被动 SAR 系统的关键技术之一。本文 针对基于星载辐射源、采用地面固定站接收机的被动 SAR 系统,分析了不同类型的频率同步误差对方位向 相位的影响,并由此得到了被动 SAR 频率同步精度要 求,提出了一种利用直达波信号实现频率同步的方法。 在利用直达波信号提取相位误差中,改进了零多普勒时 间的估计方法,近似得到了其最小方差无偏(MVU)估计 值,提高了其估计精度,从而较好地实现了频率同步。

#### 参考文献

- [1] Gerhard Krieger, Marc Rodriguez Cassola, Marwan Younis, Robert Metzig, Impact of Oscillator Noise in Bistatic and Multistatic SAR. IGARSS'05, Korea, vol. 2, pp. 1043-1046.
- [2] Shengkang Zhang, Ruliang Yang, Analysis of Oscillator Phase Nosie Effects on Bistatic SAR. EUSAR 2006.
- [3] Wenqin Wang, Xiongdong Liang. A Phase Synchronization Approach for Bistatic SAR system. EUSAR 2006. p11-07.
- J. Sanz-Marcos, P. Lopez-Dekker, J. JMallorqui. SAB-RINA: A SAR bistatic receiver for interferometric applications. IEEE Geo and Remote Sensing Letter, 4(2): 307-311, April 2007.
- [5] Paco Lopez-Dekker, Pau Serra-Morales and J J. Mallorqui. Temporal Alignment and Doppler Centroid Estimation in Opportunistic Bistatic SAR Systems. EUSAR 2008, pp135-138.
- [6] Paco Lopez-Dekker, J J. Mallorqui and Pau Serra-Morales. Phase and Temporal Synchronization in Bistatic SAR System Using Sources of Opportunity. IGARSS, pp. 97-100, July 2007.
- [7] 童宝润.时间统一系统[M],北京:国防工业出版社, 2003;pp.54-59.
- [8] Yongsheng Zhang, Diannong Liang, Zhen Dong. Analysis of Frequency Synchronization Error in Spaceborne Parasitic Interferometric SAR System. IGARSS' 06. pp. 3047-3050.
- [9] Gierull. C: Bistatic Synthetic Aperture Radar, Technical Report TR 2004-190, Defence R&D Canada Ottawa. Canada, 2004, http://cardpdf. drdc. gc. ca/PDFS/unc34/ p523308. pdf

#### 作者简介



张启雷(1985-),男,甘肃景泰人,硕 士研究生,主要研究方向为基于星载辐射 源的被动 SAR 同步及成像算法研究。 E-mail: plazhangql@163.com

常文革(1965-),男,陕西岐山人,教授,博士生导师,长 期从事超宽带雷达的系统设计和成像处理等方面的研究。

李建阳(1981-),男,河南舞钢人,博士研究生,主要研究 方向为合成孔径雷达成像及运动补偿研究。